실선체 곡면 제작을 위한 선형 배열 롤 셋 공정의 적용에 관한 연구

심도식¹ · 양동열[#] · 정성욱² · 한명수²

A Study on the Application of Line Array Roll Set Process for the Manufacture of Real Ship Hull Plates

D. S. Shim, D. Y. Yang, S. W. Chung, M. S. Han

(Received December 4, 2009 / Revised February 23, 2010 / Accepted February 25, 2010)

Abstract

The line array roll set(LARS) process, as one of many kinds of incremental forming processes, is a continuous process in which a flat metal plate is formed into a singly or doubly curved plate through successive passes of forming rolls. It was found that the curvature level of the formed plates in the previous study was well over the curvature required in shipyards. This fact shows that the LARS method has good potential for shipbuilding applications. The major purpose of the present study is to estimate experimentally the general applicability of the line array roll set process for the manufacture of ship hull plates. In this study, the target shapes are selected through investigation of the shape classification of ship hull plates that comprise a certain vessel. Forming processes for twisted shapes are analyzed with the finite element method(FEM) and the results of experimental work are presented. On the basis of the experimental and numerical results, the LARS process is applied to the production of real outer hull plates of a small patrol ship.

Key Words : Incremental Forming, Roll Set, Twisted Shape

1. 서 론

조선 산업(shipbuilding industry) 현장에서 건조되는 대형 선박은 다양한 형상의 이중 곡률 외판으로 구성되어 있다. 현재 생산 현장에서의 선박 외판(ship hull) 가공 공정은 평판에서부터 롤 벤딩(roll bending) 가공을 거쳐 1 차 가공이 된 후, 토치(gas flame torch)에 의한 국부적 가열을 이용하는 선상 가열 공정(Line heating process)을 통해 제작된다. 하지만 아직까지도 선상 가열 공정이 수작업에 의해 이루어지고 있어 생산성이 낮다는 단점을 가지고 있으며, 열원에 의한 고온 및 소음 발생 등에 따른 열악한 작업 환경이 문제점으로 대

두되고 있다. 이러한 배경으로 국내외에서는 이중 곡률을 가진 판재(doubly curved plates)를 효율적으로 제작하기 위한 시도로, 선상 가열 자동화 공정 및 냉간 가공 공정 등을 이용한 이중 곡면 제작을 위한 연구가 진행되고 있다[1~3]. 이에 Shim 과 Yang[4] 등은 생산성을 향상시키기 위한 냉간 가공 방법으로 선형 배열 롤 셋(Line array roll set, LARS)을 이용한 점진적 성형 공정을 제안하였으며 소규모 실험 장치를 이용한 이중 곡면 제작 실험을 통하여 그 가능성을 확인하였으며, 실제 현장 적용성 연구를 진행 중에 있다.

본 연구에서는 선형 배열 롤 셋 공정의 조선 산업 적용을 위한 연구로서 실제 선체(船體) 곡면

1. KAIST 기계공학과

2. ㈜대우조선해양

교신저자: KAIST 기계공학과, dyyang@kaist.ac.kr

에 대한 성형 가능성을 검토하기로 한다. 대부분의 선체 곡면은 이중 곡률과 함께 비틀림(twisting) 특성을 가진 형상들로, 본 공정의 선체 곡면 성형에의 적용을 위해서는 비틀림 성형이 가능하여야 한다. 이러한 비틀림 성형에 대한 가능성을 유한요소 해석(finite element analysis)을 통해 검토하였으며, 그 결과를 실제 성형 실험에 반영하여 비틀림 곡면 성형을 시도하였다. 마지막으로 현재 조선소에서 제작 중인 해안 경비정의 외곡면(outer hull plate)들 중 이러한 비틀림 특성을 가진 이중 곡면을 목적 형상으로 선정하고, LARS 공정을 적용하여 조선 산업에서의 곡면 가공에 대한 냉간가공(cold forming) 기술 적용 가능성을 확인해보기로 한다.

2. 선형 배열 롤 셋을 이용한 이중 곡면 제작

본 공정의 실험적 연구를 위해 제작된 소형 실험 장치를 Fig. 1 에 나타내었다. 그림에서와 같이 회전뿐만 아니라 x, y, z 방향으로 위치 조절이 가능한 롤들이 일렬로 배열되어 상하부 대칭으로 각각 3 개의 라인(three line arrays)으로 구성된다. 각 상하부의 중앙 열에 배열된 롤들은 모터에 의해 구동되는 구동롤(driving roll)들로 구성되며, 그 외곽의 두 개의 열에 배치된 롤들은 자유 회전이 가능한 유히롤(idle roll)들로 구성된다. 상하부 롤 셋 사이에 위치한 금속 판재는, 구동롤과 유히롤의 상대적인 높이 배열에 의해 굽힘 변형을 받게 되고, 중앙의 구동롤 열이 회전을 하게 되면 판재와의 접촉에 의한 마찰력에 의해 판재가 이동함으로써 전 영역에 걸쳐 변형을 발생시키게 된다.

단일 곡면과 이중 곡면의 경우, 선형 연구를 통해 선체 곡면의 실제 곡률 범위 이상으로 성형 가능성을 확인하였고[5], 실선체 곡면에 대한 선형 배열 롤 셋 공정의 적용 범위를 더욱 증가시키기 위해서는 실선체 곡면들이 가지는 공통적인 특징인 비틀림(twisting) 특성을 가지는 형상들에 대한 성형 검토가 필요하게 된다. 따라서 유한요소법을 이용한 성형 해석 및 성형 실험을 통해 이들 형상의 성형에 대한 연구를 아래와 같이 진행하였다.

3. 롤 셋을 이용한 판재의 비틀림 성형

3.1 롤 배열 형태에 따른 성형 해석

판재의 비틀림 성형의 경우, Fig. 2 에서와 같이

Fig. 1 Line array roll set system

Fig. 2 Roll arrangement for twisting of plate

(a) Alternate arrangement
(b) In-line arrangement I (c) In-line arrangement II
Fig. 3 Three types of roll arrangements for twisting of plate (FE simulation models)

중앙의 구동롤 열을 기준으로 좌우의 유히롤 열을 임의의 각만큼 어긋나게 배열한 상태에서, 판재를 삽입하여 롤에 의해 판재가 반대편으로 이동되면서 비틀림 성형이 이루어지게 된다.

이중 곡면 성형 시 롤 배열 형태에 따른 성형성에 대해서는 실험 및 FEM 해석을 통해 이미 검토가 되었으며[6], 그 결과 오목형(concave)의 이

Table 1 Material properties of Grade-A mild steel
(power-law form of strain hardening
equation: $\sigma = K\varepsilon^n$)

	GR-A mild steel
Thickness (mm)	8
Modulus of elasticity (GPa)	206
Poisson's ratio	0.33
Yield stress (MPa)	279.5
K (MPa)	703.25
n	0.162

중 곡률을 가지는 판재를 성형하는데 있어서는 구동롤과 유출롤이 동일 선상에 위치하는 일렬 배열(in-line arrangement)을 이용할 경우, 최종 성형된 곡면의 곡률량과 성형 곡면 품질에 있어서 효과적임을 확인하였다. 이와 마찬가지로 현재 제작된 장치에서는 롤의 위치 변화에 의한 롤 배열 형태 및 간격 조절이 제어 가능한 공정 변수이므로 판재의 비틀림 성형 시, 롤 배열 형태와 롤 열간 거리에 따른 성형성을 파악하기 위해 Fig. 3에서와 같은 유한 요소 해석 모델을 사용하여 성형 결과를 검토하였다. 그림에서와 같이 판재를 동일한 비틀림 각(40°)만큼 성형하는데 있어서, 교대 배열(Fig. 3(a))과 일렬 배열(Fig. 3(b)) 그리고 롤 열간의 거리를 증가시킨 경우(Fig. 3(c))에 대해 비교, 검토하였다. 여기서 각 롤 배열 형태에 따른 성형성 비교를 위해 롤 셋에 의한 판재의 부하(load) 상태와 롤 셋 제거로 인한 제하(unloading) 상태에서의 판재의 비틀림량을 각각 관찰하여 롤 배열 형태에 따른 스프링백(springback)량을 알아보기로 한다. 해석에 사용된 판재는 두께 8mm의 조선용 연강(Grade-A mild steel) 판재($1000\text{mm} \times 1000\text{mm}$)이며, 인장 시험 결과 재료의 물성을 Table 1에 나타내었다. 해석에는 유한 요소 해석 프로그램인 ABAQUS v.6.4(Implicit)를 이용하였으며, 각 롤들은 강체 곡면(rigid surface)으로 모델링 하였고 소재는 8 절점 육면체 체적요소로 구성하였다. 두께 방향으로 3층의 요소가 배치되도록 하여 총 요소수는 20600개가 되도록 하였다.

3.2 성형 해석 결과

Fig. 4(a)s는 일렬 배열을 이용한 판재의 비틀림 성형 진행을 보여주고 있다. 각 롤 배열 형태에 따른 스프링백량 검토를 위해 Fig. 4(b)에서와 같이

Fig. 4 Result of FE simulation (In-line arrangement I)

Fig. 5 Results of FE simulation(left: before springback, right: after springback)

롤링(rolling)에 의해 비틀림 성형이 이루어진 영역만을 추출하여(공정 특성상 성형이 되지 않는 판재 양끝을 제외), 입구부(inlet)와 출구부(outlet)의 에지 프로파일(edge profile)을 y-z 평면에 투영하여, 각 배열 형태에 따른 판재의 스프링 백 전후의 프로파일을 Fig. 5에 나타내었다. 그림에서와 같이 세 가지 경우 모두 초기 비틀림각을 40° 로 하였으며(각 경우의 왼편 그림), 최종 롤이 제거되고 스프링백 후 성형된 판재의 입구부와 출구부의 두 프로파일간의 비틀림각을 오른편에 나타내었다.

그림에서와 같이 롤의 교대 배열을 이용하는 경우(Fig. 5(a)), 최종 성형 곡면의 비틀림각은 17° 로 가장 낮게 나타났으며, 이에 비해 일렬 배열의 경우 최종 비틀림각이 교대 배열에 비해 상대적으로 크게 나타남을 알 수 있다. 또한 일렬 배열을 이용하는 경우에 있어서는 롤 열 간의 간격을 줄일 경우(Fig. 5(b), In-line arrangement I) 최종 비틀림각이 32° 로, 가장 큰 비틀림각을 얻을 수 있어 판재의 비틀림 성형 시 가장 효과적인 롤 배열 형태임을 알 수 있다.

4. 비틀린 이중 곡면 성형 실험

앞선 유한 요소 해석 결과를 바탕으로, 판재의 비틀림 성형 시에 효과적인 일렬 배열을 이용하여 비틀림 특성을 가진 이중 곡면 형상의 성형을 시도하였다. 해석 내용과 동일한 두께 8mm의 조선통연강(GR-A mild steel) 판재(1000mm*2000mm)를 이용하여 비틀린 이중 곡면에 대한 성형 실험을 실시하였다.

최종 스프링백 후의 실험 결과를 Fig. 6에 나타내었으며, 성형된 판재의 비틀림을 확인하기 위해 횡방향 단면 곡선들과 판재의 중양을 지나는 종방향 단면 곡선을 Fig. 7에 나타내었다. 횡방향 단면 프로파일에 보이는 바와 같이 임의의 곡률을 가진 프로파일들이 x 방향으로 진행함에 따라 점점 회전되어 나타남을 확인할 수 있으며, 이는 성형된 판재가 x 축에 대해 비틀려있는 형상임을 의미한다. 이를 통해 비틀림 특성을 가진 이중 곡면에 대한 본 공정의 성형 가능성을 확인할 수 있게 되었다.

앞선 성형 해석과 실험 결과를 바탕으로, 선체 외곡면 중 비틀림 특성을 가진 이중 곡면 성형에의 실제적 적용을 위해 현장 적용 연구를 진행하였으며, 그 내용을 다음 장에 언급하였다.

Fig. 6 Finally formed shape

(a) Transverse cross-section

(b) Longitudinal cross-section

Fig. 7 Cross sections of formed shape

5. 실제 선체 외곡면 성형에의 적용

5.1 적용 연구 대상의 선정

실선체의 비틀린 이중 곡면 제작 검토를 위해, 현재 건조 중인 해안 경비정(Fig. 8(a)) 한 척을 선정하였다. 선체를 구성하고 있는 약 40 여개의 다양한 크기와 곡률을 가지는 외곡면(판재 두께 6mm)들 중, 비틀림 특성을 가진 이중 곡면을 적용 대상 곡면으로 선정하였다. Fig. 8(b)은 선정된 목적 곡면의 CAD 좌표상 점군(point clouds)을 나

(a) Patrol ship

(b) Target shape

(length≈2.5m, width≈1.0m, thickness=6mm)

Fig. 8 Target shape for application of LARS process

(a) Transverse cross-sections

(b) Longitudinal cross-section

Fig. 9 Cross-sectional profiles of target shape

타내며, 좀 더 구체적인 곡면 형상 파악을 위해 Fig. 9 에 종방향과 횡방향의 단면 곡선을 나타내

Fig.10 Experimental result

었다. 그림에서와 같이 횡방향 단면 곡선들은 임의의 곡률 반경을 가지면서 길이 방향에 대해 비틀려 있으며, 반대 방향의 종방향 곡률을 가지고 있는 안장형(saddle)의 곡면임을 알 수 있다.

이러한 목적 곡면에 대한 정보를 토대로 곡면 모델링을 하여 곡면과 물 간 접촉점 계산 프로그램에 입력하여 각 물들의 높이 방향 스트로크(stroke)를 계산하게 된다.

5.2 실험 결과

경비함 선체 외곡판 중 대표 곡면인 비틀린 이중 곡면을 선정하여 점진적 냉간 롤 성형의 적용성 판단을 위한 실험을 진행하였다. 비틀린 곡면에 대한 성형 해석과 실험에 사용된 동일한 롤 배열 형태(일렬 배열 형태)와 실제 해안 경비정의 외판과 동일한 두께인 6mm 연강 판재를 이용하여 실선체 목적 형상에 대한 성형 실험을 실시하였다. 성형이 끝난 후 조선소 내 제작 현장과 동일하게 목형(wood template)에 의한 측정을 통해 성형 정도를 확인하였다. Fig. 10에서와 같이 최종 성형된 곡면 위에 4개의 목형을 설계 도면에 따라 지정된 라인에 위치시킨 뒤, 각 목형 위치에서의 곡면 성형 오차를 관찰하였다. 그림에서와 같이 4개의 목형 위치에서 성형된 곡면이 목적 곡면과 거의 일치함을 확인할 수 있다.

Fig.11 Comparison of formed plate and target shape at the location of each template

보다 정확한 비교를 위해 Fig. 11에서와 같이 4개의 목형 위치에서의 레이저 스캐닝(laser scanning)된 가공 형상과 목형의 단면 곡선을 비교하였다. 그 결과 약 2 mm 이내의 성형 오차를 확인할 수 있었으며, 이는 현재 조선 현장에서 제시하고 있는 10mm 이내의 허용 오차(allowable error)를 만족하는 결과이다. 상기의 실험 결과는 조선 분야에서 자동화가 어려운 기술로 여겨져 왔던 복잡한 형상의 곡면 제작에 대해 냉간 가공 기술을 적용했다는 점에서 의미를 가지게 된다.

6. 결 론

대형 선박 건조를 위한 곡면 가공 공정에 선형 배열 롤 셋 공정의 산업적 적용을 위해, 실선체 곡면 성형에 대한 성형 가능성을 검토하였다. 실선체 곡면 성형에의 적용을 위해서는 판재의 비틀림 성형이 필수적이다. 이에 유한요소해석을 통해 비틀림 성형 해석을 실시하였으며, 그 결과를 실제 성형 실험에 반영하여 실험을 실시하였다. 실험 결과,

비틀림 특성을 포함한 대표 곡면인 비틀린 이중 곡면에 대한 성형 가능성을 확인 함으로서 선형 배열 롤 셋 공정에 대한 실선체 곡면 성형에의 적용 가능 범위를 넓힐 수 있었다.

또한 현재 조선소에서 건조 중인 경비함의 외곡면 중 일부 곡면을 LARS 실험 장치를 이용하여 성형하였으며, 측정 결과 2mm 이내에서 성형에 성공하였다. 현재 유사 경비함 호선이 건조 중에 있고 차기 호선부터는 본 연구에 의해 개발된 냉간 가공 기술에 의해 제작한 곡면이 적용될 예정이다. 앞으로 여러 형상의 선체 외곡면에 대응하는 정밀 성형을 위한 공정 설계가 필요하고, 이에 대한 연구가 진행 중에 있다. 현재까지 두께 6~10mm 판재에 대한 곡면 가공에 대해서는 어느 정도 성과가 있었으며, 대형 선박에의 적용을 위한 후판의 냉간 곡가공에 대한 연구를 진행해 나갈 예정이다.

후 기

본 연구는 경상남도 지역산업 중점기술개발 사

업인 “장방형 대형 후곡관용 점진적 롤 성형 시스템 개발”의 일부이며 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] T. Nomoto, T. Ohmori, T. Sutoh, M. Enosawa, K. Aoyama, M. Saitoh, 1991, Development of simulator for plate by line heating, J. Soc. Nav. Arch. Jpn., Vol. 170, pp. 577~586.
- [2] F. Nishioka, M. Matsuishi, W. Yasukawa, O. Tohgoh, K. Nishimaki, T. Tanaka, T. Yamauki, 1978, On automatic bending of plates by the universal press with multiple piston heads (1st Report : Fundamental Study), Trans. Soc. Nav. Arch. Jpn., Vol. 132, pp. 481~501.
- [3] E. H. Rady, 1992, Mechanics of die-less forming of doubly curved metal shells, Ph. D. Thesis, Dept. of Ocean Engineering, M.I.T., Cambridge.
- [4] D. S. Shim, C. G. Jung, D. Y. Seong, D. Y. Yang, J. M. Han, M. S. Han, 2007, Process development and simulation for cold fabrication of doubly curved metal plate by using line array roll set, Numiform2007, Portugal, pp. 865~870.
- [5] D. S. Shim, D. Y. Yang, M. S. Han, S. W. Chung, K. H. Kim, H. J. Roh, 2008, Experimental study on manufacturing doubly curved plates using incremental rolling process, Proc. of Advan. Technol. of Plast., Gyeongju, Korea, pp. 887~888.
- [6] D. S. Shim, D. Y. Seong, C. G. Jung, D. Y. Yang, S. W. Chung, M.S. Han, 2008, Investigation on types of roll arrangements in line array roll set to fabricate the plate with large curvatures, Proc. of Soc. Tech. Plast. Conf, Jeju, Korea, pp. 158~161.